

Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки 12.03.02 Опототехника  
 Отделение материаловедения

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Лазерная установка для зажигания энергетических материалов

УДК 621.373.826:662.58

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В71	Печникова Дарья Олеговна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Степанов С.А.	к.ф.-м.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Маланина В.С.	к.э.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина М.С.	—		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Степанов С.А.	к.ф.-м.н.		

Томск – 2021 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код	Результат освоения ООП
<b>Универсальные компетенции</b>	
<b>УК(У)-1</b>	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
<b>УК(У)-2</b>	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
<b>УК(У)-3</b>	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
<b>УК(У)-4</b>	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной форме на государственном и иностранном (-ых) языке
<b>УК(У)-5</b>	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этническом и философском контекстах
<b>УК(У)-6</b>	способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течении сей жизни
<b>УК(У)-7</b>	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
<b>УК(У)-8</b>	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций.
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
<b>ОПК(У)-1</b>	Способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики
<b>ОПК(У)-2</b>	Способность осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий
<b>ОПК(У)-3</b>	Способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения физико-математический аппарат
<b>ОПК(У)-4</b>	Способность учитывать современные тенденции развития техники и технологий в своей профессиональной деятельности
<b>ОПК(У)-5</b>	Способность обрабатывать и представлять данные экспериментальных исследований
<b>ОПК(У)-6</b>	Способность собирать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по тематике исследования
<b>ОПК(У)-7</b>	Способность использовать современные программные средства подготовки конструкторско-технологической документации
<b>ОПК(У)-8</b>	Способность использовать нормативные документы в своей деятельности
<b>ОПК(У)-9</b>	Способность владеть методами информационных технологий, соблюдать

	основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
<b>Профессиональные компетенции</b>	
<b>ПК(У)-1</b>	Способность к математическому моделированию процессов и объектов оптоэлектроники и их исследованию на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и самостоятельно разработанных программных продуктов
<b>ПК(У)-2</b>	Способность к проведению экспериментальных измерений оптических, фотометрических и электрических величин и исследования различных объектов по заданной методике
<b>ПК(У)-3</b>	Готовность формировать презентации, научно-технические отчеты по результатам выполненной работы, оформлять результаты исследований в виде статей и докладов на научно-технических конференциях
<b>ПК(У)-4</b>	Способность к наладке, настройке, юстировке и опытной проверке оптических, оптико-электронных приборов и систем
<b>ПК(У)-5</b>	Способность к анализу, расчету, проектированию и конструированию в соответствии с техническим заданием типовых систем, приборов, деталей и узлов оптоэлектроники на схемотехническом и элементном уровнях
<b>ПК(У)-6</b>	Способность к оценке технологичности и технологическому контролю простых и средней сложности конструкторских решений, разработке типовых процессов контроля параметров механических, оптических и оптико-электронных деталей и узлов
<b>ПК(У)-7</b>	Способность к участию в монтаже, наладке, настройке, юстировке, испытаниях, сдаче в эксплуатацию опытных образцов, сервисном обслуживании и ремонте оптической техники
<b>ПК(У)-8</b>	Способность к расчету норм выработки, технологических нормативов на расход материалов, заготовок, инструмента, выбору типового оборудования, предварительной оценке экономической эффективности техпроцессов
<b>ПК(У)-9</b>	Способность к разработке технических заданий на конструирование отдельных узлов приспособлений, оснастки и специального оборудования, предусмотренных технологией
<b>ПК(У)-10</b>	Способность к участию в работах по доводке и освоению техпроцессов в ходе технологической подготовки производства оптических и оптико-электронных приборов
<b>ПК(У)-11</b>	Способность к организации входного контроля материалов и комплектующих изделий
<b>ПК(У)-12</b>	Способность к внедрению технологических процессов производства, метрологического обеспечения и контроля качества оптических и оптико-электронных приборов и их элементов

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки 12.03.02 Опотехника  
 Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
Степанов С.А.  
 (Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы
---------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4В71	Печникова Дарья Олеговна

Тема работы:

Лазерная установка для зажигания энергетических материалов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	25.01.2021, №25-13/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2021
--	------------

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Лазерный исследовательский комплекс на основе неодимового лазера импульсного действия, применяемый для исследования процессов лазерного зажигания энергетических материалов. Поведение перхлората аммония при лазерном иницировании.</p>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной</i></p>	<p>В работе должны быть отражены результаты литературного анализа по следующим вопросам: принцип работы и устройство лазера, преобразование излучения оптическими системами, принципы измерения параметров лазерного излучения, свойства исследуемого материала, зависимость порогов зажигания от плотности прессованного перхлората аммония. Работа направлена на оценку применимости лазерного комплекса к изучению процессов зажигания</p>

работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).	энергетических материалов, тем самым необходимо выявить основные требования к подобным системам и провести сравнение характеристик комплекса с требуемыми. Определить зависимость коэффициента отражения и пропускания от плотности образцов для различных толщин спрессованных образцов. Изучить структуры образцов, Изучить влияние повреждения поверхности образцов на чувствительность.
<b>Перечень графического материала</b> (с точным указанием обязательных чертежей)	
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> (с указанием разделов)	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСТН ШБИП Маланина В.А.
Социальная ответственность	Ассистент Черемискина М.С.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.10.2020 г.
--	---------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Степанов Сергей Александрович	к.ф.—м.н		
Старший преподаватель ОМ	Форат Егор Викторович	—		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В71	Печникова Дарья Олеговна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4В71	Печниковой Дарье Олеговне

Школа	Новых производственных технологий	Отделение школы (НОЦ)	Материаловедение
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Оптотехника

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Проект выполнен на базе лабораторий ТПУ отделения материаловедения. В реализации проекта задействованы 2 человека: руководитель проекта и лаборант
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ 31532-2012 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность.»
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления по страховым взносам -30,2% от ФОТ

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Оценка коммерческого потенциала НТИ
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Формирование плана и графика разработки научного исследования: определение контрольных событий проекта; разработка графика Ганта. Формирование бюджета НИ: материальные затраты; заработная плата (основная и дополнительная); отчисления на социальные нужды; накладные расходы.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Определение ресурсной, финансовой, экономической составляющей

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. <i>Альтернативы проведения НИ</i>
2. <i>График проведения и бюджет НИ</i>
3. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	13.02.21
---	----------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Маланина Вероника Анатольевна	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В71	Печникова Дарья Олеговна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА**  
**«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4В71	Печниковой Дарье Олеговне

<b>Школа</b>	<b>Новых производственных технологий</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>Материаловедения</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	12.03.02 “Оптотехника”

Тема ВКР:

<b>Лазерная установка для зажигания энергетических материалов</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Лазерная установка для исследования процессов зажигания. Разработка и анализ вариантов ее модернизации и практическое применение для процессов зажигания. Областью применения является ракетостроение, горновзрывные работы, военное дело.
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>— специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>— организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ГОСТ 31581-2012. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий.</li> <li>2. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</li> <li>3. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.</li> <li>4. ТК РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019) - ГОСТ 12.2.032-78</li> </ol>
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Показатели микроклимата в помещении;</li> <li>2. Уровень шума на рабочем месте;</li> <li>3. Недостаточная освещенность</li> <li>4. Нервно-психические перегрузки.</li> </ol> Опасные факторы: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Пожаропасность;</li> <li>2. Взрывоопасность;</li> <li>3. Поражение химическими веществами;</li> </ol>

	4. Повышенный уровень статического электричества.
3. Экологическая безопасность:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- анализ воздействия объекта на атмосферу (выброс парниковых газов);</li> <li>- анализ воздействия объекта на гидросферу (загрязнение водных источников компьютерными отходами);</li> <li>- анализ воздействия объекта на литосферу (загрязнение почвы химическими отходами);</li> </ul>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<p>Возможные ЧС: пожар, наводнение, ураган, землетрясение.</p> <p>Наиболее типичные ЧС: пожар.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина Мария Сергеевна	-		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В71	Печникова Дарья Олеговна		



## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 95 с., 39 рис., 19 табл., 40 источников.

Ключевые слова: лазер, энергетические материалы, перхлорат аммония, мелкодисперсный алюминий, порог генерации, чувствительность к лазерному излучению.

Объектом исследования является лазерная установка для зажигания энергетических материалов.

Цель работы — Изучить возможность применения исследуемой лазерной установки для зажигания энергетических материалов.

В процессе работы проводилось исследование зависимости энергии генерации лазера от напряжения накачки и КПД лазера от напряжения накачки, изучалось распределение энергии излучения лазерного пучка на поверхности образца, производилась селекция мод, изучалась методика измерения порога генерации для смеси перхлората аммония и алюминия, изучалось поведение образцов при повторном облучении.

В результате исследования были сделаны выводы о возможности применения исследуемой лазерной установки для зажигания энергетических материалов и проведены некоторые эксперименты по взаимодействию лазерного излучения с веществом.

Степень внедрения: результаты проделанной работы будут использоваться в дальнейшем для изучения энергетических материалов.

Область применения: исследования в области чувствительности энергетических материалов к лазерному излучению.

В будущем планируется улучшить установку, с помощью модификации электрической схемы накачки с целью достижения прямоугольного импульса, кроме этого, на установке планируется достижение одномодового, одночастотного режима, определить степень влияния структуры образца на чувствительность к лазерному излучению.

## Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. СанПиН 2.2.4.548-96 "Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901704046> (дата доступа: 05.05.2021) . – Текст: электронный.
2. СП 2.13130 Системы противопожарной защиты Обеспечение огнестойкости объектов защиты. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200096437> (дата обращения 09.05.2021). – Текст: электронный.
3. ГОСТ 12.1.003-2014 "Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности". – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200118606> (дата обращения: 04.05.2021). – Текст: электронный.
4. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/520023> (дата обращения: 02.05.2021). – Текст: электронный.
5. ГОСТ 12.1.014-84 Система стандартов безопасности труда. Воздух рабочей зоны. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/5200317> (дата обращения: 04.05.2021). – Текст: электронный.
6. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/5200313> (дата обращения: 06.05.2021). – Текст: электронный.
7. ГОСТ 12.1.040-83 Система стандартов безопасности труда. Лазерная безопасность. Общие положения. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/5200311> (дата обращения: 02.05.2021). – Текст: электронный.

8. ГОСТ 12.2.032-78 Рабочее место при выполнении работ сидя. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200003913> (дата обращения: 03.05.2021). – Текст: электронный.
9. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/456054197> (дата обращения: 04.05.2021). – Текст: электронный.
10. ГОСТ Р ИСО 148-1-2013 Материалы металлические. Испытание на ударный изгиб на маятниковом копре по Шарпи. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200108014> (дата обращения: 04.07.2020). – Текст: электронный.
11. ГОСТ 31581-2012 Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200102411> (дата обращения: 04.05.2021). – Текст: электронный.
12. ГОСТ ИСО 8995-2002 Принципы зрительной эргономики. Освещение рабочих систем внутри помещений. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200032039> (дата обращения: 04.05.2021). – Текст: электронный.

## Оглавление

Введение	14
1 Литературный обзор	15
1.1 Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными системами	15
1.2 Принцип работы лазера	17
1.3 Схемы накачки	18
1.4 Оптическая накачка лазера	20
2 Методика изучения лазерного комплекса	23
2.1 Описание установки	23
2.2 Описание приборов	25
2.2.1 Измеритель калориметрический твердотельный ИКТ-1Н	25
2.2.2 Осциллограф TDS 2024C	26
2.2.3 Фотоэлемент коаксиальный ФЭК-15 КМ	26
2.2.4 Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) H5773 фирмы Hamamatsu	28
2.2.5 Системы измерения мощности и энергии Maestro компании Gentec-EO	28
2.2.6 Блок питания	29
2.2.7 Активные элементы твердотельных лазеров	30
3. Результаты изучения лазерного комплекса	32
3.1 Изучение проекционной схемы	32
3.2 Изучение энергии генерации лазера	34
3.3 Определение коэффициента деления	39
3.4 Изучение распределения энергии на поверхности образца	42
4 Влияние лазерного излучения на энергетические материалы	44
4.1 Пиротехнические составы	44
4.2 Методика определения порога зажигания образца	45
4.3 Изучение зажигания энергетических материалов	47
4.4 Изучение параметров образца	51
4.5 Измерение чувствительности смеси при повторном облучении	54
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережения	58
5.1 Структура работ в рамках научного исследования	58
5.2 Расчет трудоемкости этапов НИР	60

5.3 Разработка графика проведения научного исследования	64
5.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	65
5.4.1 Расчет материальных затрат НТИ	65
5.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	66
5.4.3 Расчет заработной платы	68
5.4.4 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала	70
5.4.5 Отчисления на социальные нужды	70
5.4.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	71
5.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	72
6 Социальная ответственность	74
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	75
6.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства	75
6.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	76
6.2 Производственная безопасность	77
6.2.1 Отклонение показателей микроклимата в закрытом помещении.	78
6.2.2 Превышение уровня шума	79
6.2.3 Недостаточная освещённость рабочей зоны	80
6.2.4 Психофизиологические факторы	81
6.2.5 Пожароопасность	81
6.2.6 Взрывоопасность	82
6.2.7 Поражение химическими веществами	82
6.2.8 Повышенный уровень электромагнитных излучений	83
6.3 Экологическая безопасность	83
6.3.1 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	84
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	84
Заключение	87
Список литературы	90

## **Введение**

Актуальность данной работы заключается в использовании лазерного инициирования энергетических материалов как альтернативу электрическому методу ввиду надежности и безопасности использования.

К настоящему времени имеется большое количество работ о взаимодействии лазерного излучения с энергетическими материалами. Однако, при изучении литературы по данной теме внимание привлекла пиротехническая смесь в состав которой входит перхлорат аммония и порошок алюминия, ввиду меньшей чувствительности к механическому воздействию и при этом большей чувствительностью к лазерному излучению в режиме модулированной добротности.

Объектом исследования является лазерная установка для зажигания энергетических материалов.

Целью данной работы является изучение возможности применения лазерной установки для зажигания энергетических материалов.

Для выполнения данной работы было поставлено несколько задач:

1. Изучить возможности применения исследуемой лазерной установки для зажигания энергетических материалов;
2. Определить влияние плотности образцов перхлората аммония с мелкодисперсным алюминием на чувствительность к лазерному воздействию;
3. Изучить влияние повреждения поверхности образцов на чувствительность.

В ходе работы было выявлено, что лазерная установка соответствует выдвинутым требованиям для осуществления поставленной задачи, а также были проведены некоторые испытания по определению порога зажигания исследуемой смеси и влияния на образец повторного облучения.

Результаты исследований могут быть применены в горнодобывающей промышленности, ракетно–космических технологиях и т.д.

# 1 Литературный обзор

## 1.1 Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными системами

Лазер — производное от английского «light amplification by simulated emission of radiation» [1], что означает «усиление света путем индуцированного испускания», что непосредственно ведет к генерации лазерного излучения [1].

Лазерный пучок отличается от излучения обычных источников света такими свойствами как:

- Незначительная ширина спектральной линии;
- Направленность (малый угол расхождения);
- Высокая интенсивность или энергия пучка;
- Способность генерировать сверхкороткие импульсы.

Для генерации лазерного излучения используются три фундаментальных явления, происходящие при взаимодействии электромагнитных волн с веществом, а именно процессы спонтанного и вынужденного излучения света и процесс его поглощения [1].

Когда свет проходит через слой вещества происходит его поглощение. Атомы или молекулы обладают дискретными или квантовыми энергетическими состояниями. В состоянии покоя атом находится на уровне с самой низкой энергией — «основное состояние». Когда на атом попадает свет с частотой  $f_{12}$  возможен переход на более высокий энергетический уровень  $E_2$ , если выполнено уравнение Бора:  $E_2 - E_1 = h \cdot f_{12}$ . Разность энергий  $E_2 - E_1$ , необходимая для того, чтобы атом совершил переход, берется из энергии падающего фотона, то есть переход сопровождается исчезновением фотона. В этом заключается процесс поглощения.

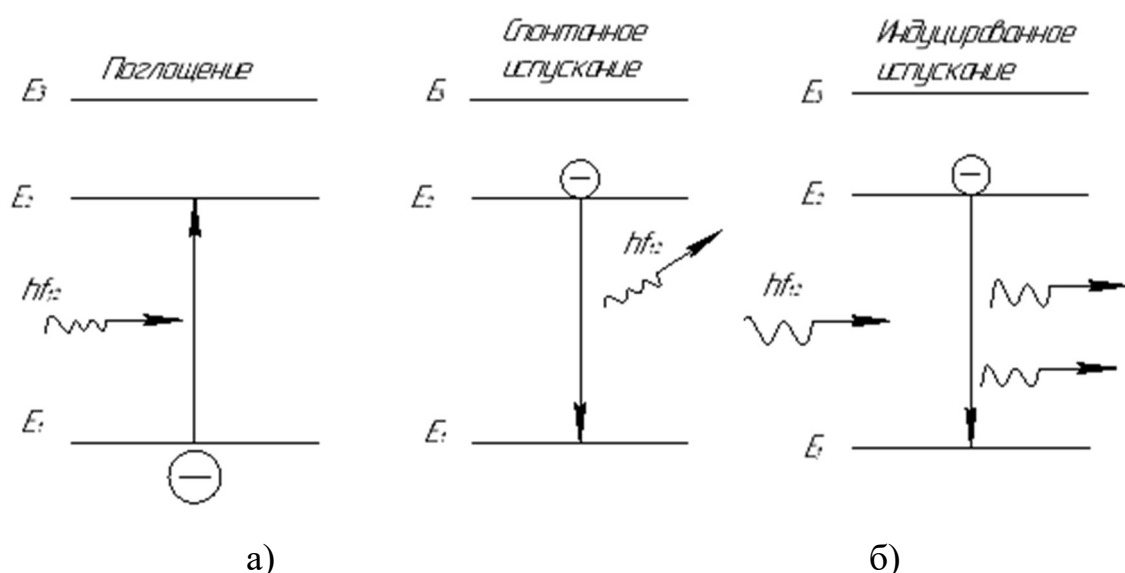


Рисунок 1 — а — Поглощение; б — Спонтанное испускание; в —  
Индуцированное излучение

Когда атомы находятся в возбужденном состоянии, спустя некоторое время происходит распад с переходом в основное состояние. Энергия, которая высвобождается в этот момент испускается в виде фотона, при этом в любом направлении пространства, так что у падающей волны отбирается энергия. Излучение называется спонтанным, если переход проходит без внешнего влияния (возврат электрона может также осуществляться без испускания). Энергия возбуждённого электрона может использоваться не только для испускания фотона, но и в других формах (в виде колебаний в кристаллической решётке и др.) [2].

Постулат Эйнштейна о вынужденном излучении заключался в том, что возвращение атома с верхнего уровня в основное состояние происходит в результате влияния световой волны извне, которая выполняет частное условие Бора.

Отличие между вынужденным и спонтанным излучением заключается в том, что в случае спонтанного излучения электромагнитная волна, которую испускает атом, имеет фазу, которой нет определённой связи с фазой волны, излучённой другим атомом. Также, испущенная волна может иметь любое направление распространения. При вынужденном излучении, так как



процесс активируется падающей волной, излучение любого атома добавляется к этой волне в той же фазе. Падающая волна определяет также направление распространения испущенной волны. То есть при вынужденном излучении происходит усиление волны.

## 1.2 Принцип работы лазера

Если населённость нижнего уровня  $N_1/g_1$  больше населённости верхнего уровня  $N_2/g_2$ , где  $N_1$  и  $N_2$  — населённость уровней (под населённостью уровней понимают число атомов в единице объёма, имеющих одинаковое энергетическое состояние), а  $g_1$  и  $g_2$  — кратности вырождения, то интенсивность изменения электромагнитной волны, которая проходит через слой некоторой толщины будет отрицательной, что способствует ослаблению волны, при обратном условии волна будет усиливаться. Когда  $N_2 > N_1$  возникает инверсия населённости, которая необходимым, но недостаточным условием для получения усиления в среде. Среда, в которой удаётся добиться инверсной заселённости, называется активной средой [1].

Наличие усиливающей среды является необходимым условием для создания оптического квантового генератора. Для этого необходимо ввести положительную обратную связь, которая возникает при размещении между двумя зеркалами с высоким коэффициентом отражения активной среды. Такую систему обратной связи называют резонатором Фабри–Перо. Простейший резонатор состоит из двух плоскопараллельных зеркал, как показано на Рисунок 2. В таком резонаторе плоская электромагнитная волна, движущаяся в направлении, которое перпендикулярно зеркалам, будет поочерёдно отражаться от них, усиливаясь при каждом прохождении через активную среду. В лазере генерация излучения начинается тогда, когда усиление активной среды компенсирует потери в нем, такие как частичный выход через зеркало из резонатора излучения [3].

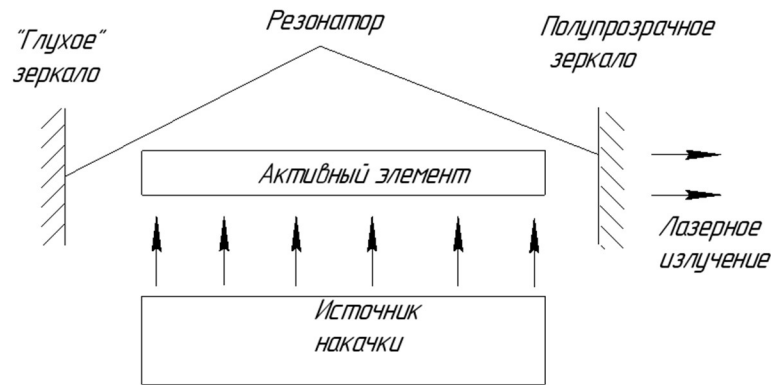


Рисунок 2 — Общая схема лазера

Лазерное излучение:

- Когерентно;
- Направленно;
- Монохроматично.

### 1.3 Схемы накачки

Рассмотрим принципы получения инверсной заселённости  $N_2 > N_1$ , заметим, что при использовании двухуровневой системы этого добиться невозможно. Даже при интенсивной накачке активной среды волной с высокой плотностью энергии в момент, когда наступят условия, при которых населённости уровней окажутся одинаковыми ( $N_2 = N_1$ ), процессы вынужденного излучения и поглощения начнут компенсировать друг друга, и в соответствии с  $dI = BI(N_2 - N_1)dz$  среда станет прозрачной. В такой ситуации обычно говорят о двухуровневом насыщении [3].

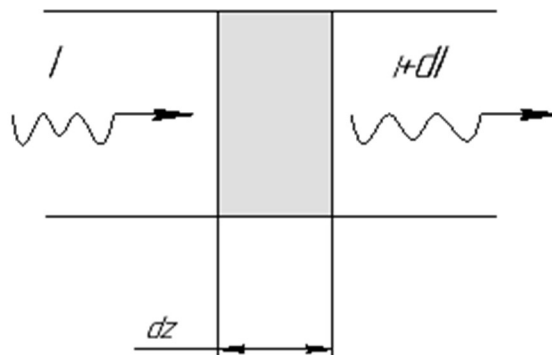


Рисунок 3 — Усиление света в активной среде

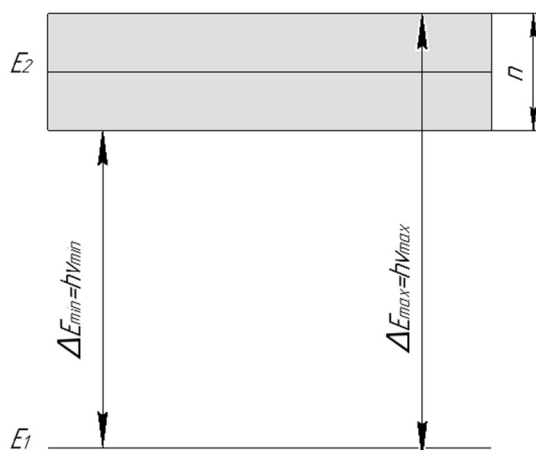


Рисунок 4 — Двухуровневая система, где  $n$  — ширина энергетического уровня

Из этого следует, что получить инверсную населённость с использованием двухуровневой системы нельзя [2].

Различные уровни энергии атомов или молекул имеют различную ширину  $n$  энергетического уровня, из этого следует, что время жизни в течение, которого атом может находиться в данном энергетическом состоянии также будет отличаться. Подобное обстоятельство позволяет создать инверсную заселённость энергетических уровней, используя трёх или четырёхуровневую схему накачки [2].

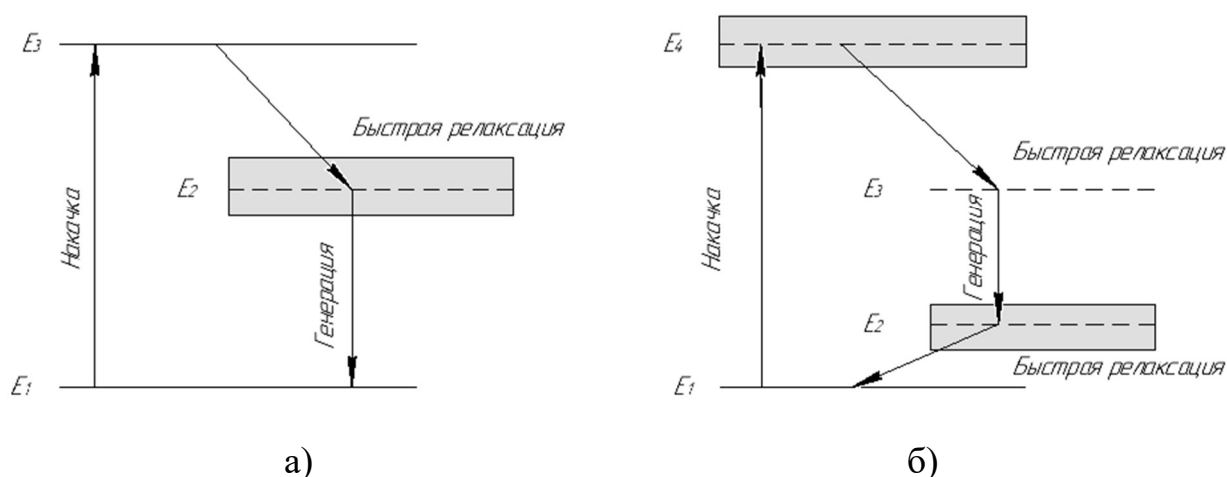


Рисунок 5 — Естественная ширина энергетического уровня (а — трехуровневая система, б — четырёхуровневая система)

В случае трехуровневой системы атомы под воздействием накачки переводятся с основного уровня  $E_1$  в возбуждённое состояние на уровне  $E_3$ .

Уровень  $E_2$  окажется инверсно заселённым относительно уровня  $E_1$  при выполнении условия  $kT \ll E_2 - E_1$ , из рисунка 5 (а) можно сделать вывод, что верхний лазерный уровень  $E_2$  будет накапливать частицы в том случае если переход между уровнями  $E_3 \rightarrow E_2$  будет достаточно быстрым, а верхний рабочий уровень является метастабильным. В четырёхуровневой системе рисунок 5 (б) накачка также переводит атомы из основного состояния в верхнее  $E_4$ . Инверсия достигается между уровнями  $E_3$  и  $E_2$ , для выполнения данного условия требуется чтобы Уровень  $E_3$  быстро заполнялся, тогда как уровень  $E_2$  должен опустошаться за счёт переходов  $E_4 \rightarrow E_3$  и  $E_2 \rightarrow E_1$ , но так как в реальной системе происходят переходы 4–1, 4–2, 3–1, 1–2 и 3–4, качество генератора и усилителя падает, а значит при этих переходах происходит уменьшение инверсии [1].

Процесс, под действием которого атомы переводятся с уровня  $E_1$  на уровень  $E_3$  для трехуровневой схемы лазера и для четырехуровневой схемы лазера с уровня  $E_1$  на уровень  $E_4$  называется накачкой. Накачка может осуществляться несколькими способами, такими как при помощи некоторых видов ламп, дающих достаточно интенсивную волну с необходимой для накачки частотой  $\nu$  и при помощи лазеров, например, полупроводниковых лазеров или сверх ярких светодиодов. В этом случае резко увеличивается КПД лазера [1].

#### **1.4 Оптическая накачка лазера**

В твердотельных лазерах наибольшее распространение получила некогерентная накачка. В качестве некогерентной накачки может быть использовано излучение естественных источников света (солнечный свет), излучение искусственных источников: газоразрядные импульсные лампы, дуговые, лампы непрерывного горения такие как, газоразрядные и лампы накаливания и т.д. Эффективность накачки зависит от ширины уровня возбуждения активного центра, он должен быть достаточно широким. Для

эффективности также необходимо, чтобы максимум линии поглощения активатора попадал в область спектра частот излучения накачки. Эффективность системы накачки определяется как отношение поглощаемого в активной среде потока к мощности, которую потребляют все лампы накачки [5].

Важные параметры газоразрядных ламп накачки:

- Эффективность преобразования электрической энергии в световое излучение;
- Спектральный состав излучения;
- Предельная мощность, при которой не нарушается работоспособность лампы.

Наибольшее распространение получили ксеноновые и криптоновые лампы накачки, так как они являются экономичными преобразователями электрической энергии в энергию оптического излучения и их спектр излучения близок к спектру абсолютно черного тела с температурой 8000–12000K [6].

Чтобы повысить эффективность ламп накачки, лампу и активный элемент помещают в осветитель. Эффективность светоотдачи осветителя очень сильно влияет на КПД всего лазера. Потери в осветителе составляют от 20 до 70 %, что в основном и обуславливает низкий КПД твердотельных лазеров [4].

Для дальнейшей работы с лазерной установкой по изучению зажигания энергетических веществ, в первую очередь нужно проверить пригодность данной установки для решения поставленных задач.

Для этого к исследуемой лазерной установке предъявляются следующие требования:

- Возможность регулировки энергии излучения;

- Возможность регистрации нескольких параметров одновременно (кинетика излучения лазера, энергия лазерного излучения, сигнал с образца);
- Возможность изменения диаметра пучка на образце;
- Установка должна иметь однородное распределение энергии в пучке на поверхности образца.

## 2 Методика изучения лазерного комплекса

### 2.1 Описание установки

Рассмотрим схему установки, используемую для проведения экспериментов.

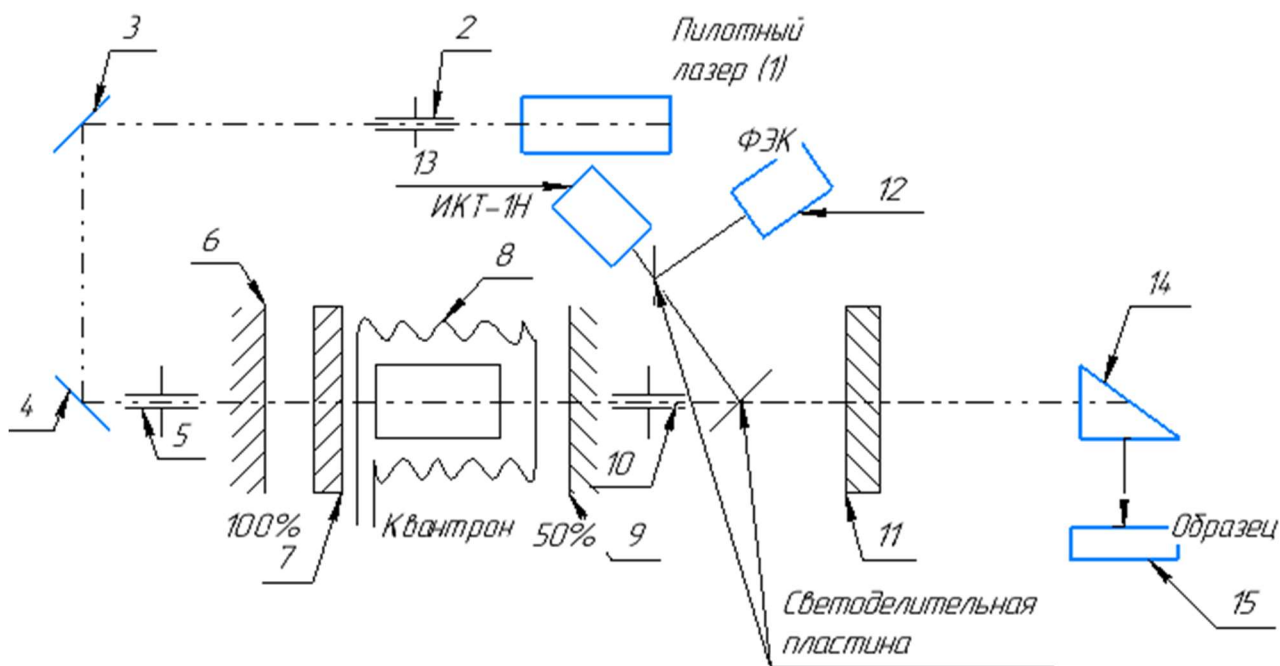


Рисунок 6 — Блок — схема экспериментальной установки. 1 — пилотный лазер; 2, 5, 10 — диафрагма; 3, 4 — поворотное зеркало; 6 — входное непрозрачное зеркало; 7 — вогнуто-выпуклая линза; 8 — квантрон; 9 — выходное полупрозрачное зеркало; 11 — линза; 12 — фотоэлемент коаксиальный ФЭК-15КМ; 13 — измеритель калориметрический твердотельный ИКТ-1Н; 14 — призма; 15 — образец

Схема лазерной установки содержит пилотный лазер, при помощи которого производится юстировка зеркал и задаётся оптическая ось. Юстировка точна, если отражённый луч от зеркала (6) и отверстие диафрагмы (2) совмещены.

Диафрагма (2), предназначена для ограничения пучка лучей, выходящих из пилотного лазера [3]. Поворотные зеркала (3), (4) — изменяют

направление хода луча, после этого происходит ограничение пучка при помощи диафрагмы (5).

Квантрон (8) — корпус из алюминия совмещает в себе активный элемент, лампы накачки (используются две газоразрядные лампы-вспышки (ксеноновые ИФП-5000), которые расположены по бокам активного элемента. Длительность лазерного импульса во многом определяется длительностью свечения ламп вспышек. Идеальной считается ситуация, когда лампы вспышки мгновенно зажигаются, горят равномерно и мгновенно погасают) и отражатель (внутренняя стенка корпуса квантрона покрытая слоем  $\text{BaSO}_4$  (раствор сульфата бария)). Ранее упоминалось, что в данной установке накачку активного элемента обеспечивают 2 ксеноновые лампы-вспышки при помощи блока питания, описанного в пункте 2.7.

Генерации достигается при использовании двух зеркал, входное непрозрачное с коэффициентом отражения 99%(6) и выходное полупрозрачное с коэффициентом отражения 50%(9).

Вогнуто-выпуклая линза с фокусным расстоянием 2000 мм (7), делает резонатор полуконфокальным. Резонатор такой конфигурации концентрирует поле около оси, тем самым уменьшая дифракционные потери. Так же данный тип мало чувствителен к разъюстировке, но не эффективно использует объем активной области [4]. Из-за предположения, что параметры лазера различны при использовании схемы с линзой и без в резонаторе, установка будет рассматриваться в 2 случаях.

После прохождения диафрагмы (10) выделяется однородная часть пучка. Которая далее падает на светоделительную стеклянную пластинку, которая пропускает часть падающего излучения, и малую часть отражает. Отражённая часть попадает на вторую светоделительную пластинку, которая так же большую часть светового потока пропускает, а малую часть отражает. Пропущенная часть, после прохождения двух светоделительных пластинок, излучения идёт на измеритель калориметрический твердотельный ИКТ-1Н (13), который позволяет измерять энергию лазерного импульса, отражённая



часть регистрируется при помощи фотоэлемента коаксиального (ФЭК) расположенный на рисунке 7 в позиции 12 с осциллографом TDS2024C (CH1), который отображает изменение интенсивности лазерного излучения во времени [2].

После светоделительной пластинки луч приходит на выпуклую линзу (11), фокусное расстояние которой составляет 360 мм, задача данного элемента схемы уменьшить диаметр пучка до требуемого размера в плоскости изображения. В данной установке элемент под номером 14 является призмой и используется для изменения направления хода луча.

При необходимости регистрации кинетики свечения зажигаемых образцов схему можно дополнить фотоэлектронным умножителем Hamamatsu (ФЭУ) и детектором для измерения энергии QE25LP-S-MB-D0. Рассмотрим ключевые элементы схемы подробнее.

## **2.2 Описание приборов**

### **2.2.1 Измеритель калориметрический твердотельный ИКТ-1Н**

Измеритель калориметрический твердотельный ИКТ-1Н предназначен для измерения энергии импульсов лазерного излучения в спектральном диапазоне 0,4–4 мкм, в режиме свободной генерации и режиме модулированной добротности [7].

Технические характеристики ИКТ-1Н [7]:

- Предельное значение плотности энергии излучения — 200 Дж/см<sup>2</sup>;
- Длительность импульса —  $10^{-4}$ –1 с;
- Диаметр измеряемого пучка лазерного излучения — 4–16 мм;
- Угловая расходимость — не более 3°;
- Длительность импульса —  $1 \cdot 10^{-8}$ – $5 \cdot 10^{-8}$  с;

- Предельное значение плотности мощности излучения —  $3 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>;
- Диапазон измерения энергии — 0.05–150 Дж.

Принцип работы ИКТ-1Н заключается в поглощении энергии излучения приемной головкой и преобразования этого излучения в значение термотока, которое измеряется и отображается на показывающем приборе блока регистрации [10].

### 2.2.2 Осциллограф TDS 2024C

Осциллограф TDS 2024C — запоминающее цифровое устройство, которое позволяет определить форму сигнала, его временные параметры, частоту, сдвиг фазы, амплитуду [8].

В данной работе используется для фиксирования интенсивности лазерного импульса во времени.

Таблица 1 — Технические характеристики осциллографа TDS 2024C [8]

Полоса пропускания	Максимальное входное напряжение	Частота дискретизации	Горизонтальная развёртка	Вертикальная развёртка
200 МГц	300 В	2 Гвыб/с	5 нс–50 с/дел	2 мВ до 5 В/дел

### 2.2.3 Фотоэлемент коаксиальный ФЭК-15 КМ

Фотоэлемент коаксиальный относится к группе специальных высокоточных фотоэлементов коаксиальной конструкции, предназначен для регистрации коротких световых импульсов с длительностью в несколько наносекунд, он преобразовывает мгновенную мощность однократного

наносекундного импульса излучения в мгновенное значение электрического импульса.

Принцип действия прибора основан на явлении внешнего фотоэффекта, т.е. испускания электронов поверхностью катода при попадании на него световой энергии. Испускаемые электроны замыкают на участке катод — анод цепь фотокатода, в которой возникает фототок, а на центральном стержне коаксиального выхода возникает электрический сигнал положительной полярности. Сигнал с коаксиального выхода прибора поступает по кабелю на осциллограф для регистрации [7].

Таблица 2 — Технические характеристики ФЭК-15 КМ [7]

Площадь фотокатода, см <sup>2</sup>	Область спектральной чувствительности, мкм	$S_{phk}$ мкА/лм, не менее	$S_{max}$ мА/лм, не менее	Длительность фронта импульса	Полоса пропускания ГГц
1,35	0,38–1,2	30	1,5( $\lambda$ =0,6 9мкм)  0,2( $\lambda$ =0,6 9мкм)	$5 \cdot 10^{-11}$	7

Данный прибор подходит для проведения измерений интенсивности лазерного излучения во времени на рабочей длине волны, поскольку он имеет неплохую спектральную чувствительность, порядка 20% при длине волны 1060 нм, также обладает нужной временной разрешающей способностью.

В случае перехвата полного пучка лазерного излучения входным окном ФЭК будет создаваться ток порядка 0,2 А, что при подключении ФЭК к осциллографу с входным сопротивлением 1МОм, будет создавать напряжение около 200 кВ, данное напряжение во много раз превышает указанное максимальное напряжение по паспорту, равное 300 В, следовательно, необходимо добиться снижения количества попадающего излучения на ФЭК.

Добиться этого можно двумя способами: изменить сопротивление на входе осциллографа или перехватывать меньшую часть пучка, что и было выполнено в ходе проектирования установки.

#### 2.2.4 Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) H5773 фирмы Hamamatsu

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) — это электровакуумное устройство, принцип работы которого основывается на фотоэлектронной и вторичной электронной эмиссии, преобразуя поток падающего излучения в электронный поток в вакууме, с последующим его усилением.

Благодаря работе в широком спектральном диапазоне от 300 нм до 1700 нм и низкому уровню шума, прибор используется при детектировании слабых световых сигналов или коротких импульсов света [9].

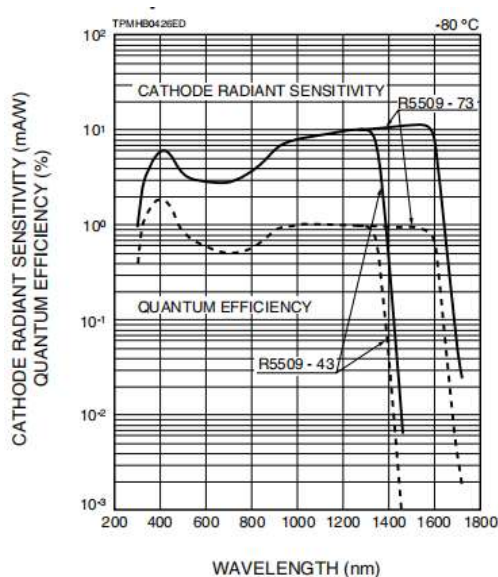


Рисунок 7— Спектральная характеристика R5509-73 ФЭУ [9]

#### 2.2.5 Системы измерения мощности и энергии Maestro компании Gentec-EO

Пироэлектрический детектор для измерения лазерной энергии. В этих датчиках используется пироэлектрический кристалл, генерирующий электрический заряд, пропорциональный поглощенному теплу. Время отклика пироэлектрического датчика зависит от времени, за которое тепло проникает в кристалл и нагревает его. Для пироэлектрических детекторов металлического типа это время равно десяткам микросекунд, поэтому они могут работать с высокой частотой повторения [7].

Характеристики детектора энергии QE25LP-S-MB-D0 [10]:

- Максимально измеримая энергия — 23 Дж;
- Спектральный диапазон — 0,19–20 мкм;
- Максимально измеримая энергия ( $\lambda$ –1060 нм,  $t$ –7нс,  $\nu$ –10Гц) — 3,8 Дж;
- Максимальная средняя мощность — 5 Вт;
- Максимальная плотность энергии — 0,6 Дж/см<sup>2</sup>;
- Максимальная средняя плотность мощности — 10 Вт/см<sup>2</sup>

### 2.2.6 Блок питания

Блок питания содержит ёмкостной накопитель, катушку индуктивности и импульсные лампы. Ёмкостной накопитель состоит из нескольких секций, каждая из которых содержит два конденсатора, ёмкость одного конденсатора 40 мкФ. В данной работе используется только 1 секция, состоящая из 2 конденсаторов, следовательно, общая ёмкость равна 80 мкФ. Секции соединены между собой через индуктивность. Индуктивность служит для формирования формы импульса, т.к. задерживает процесс разряда и смещает по времени разряд с каждой секции.

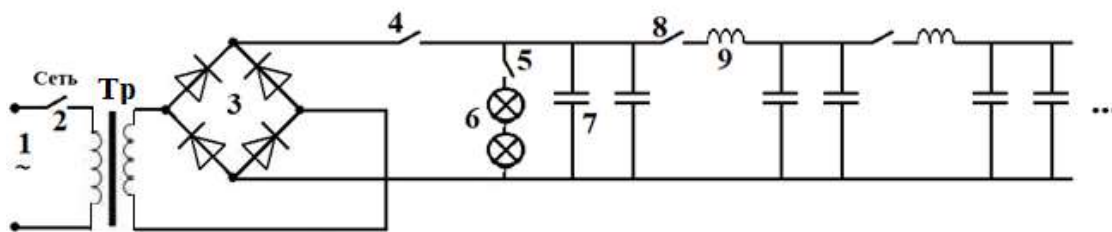


Рисунок 8 — Схема блока питания ламп—накачки: 1 — электрическая сеть, 2 — ключ включения блока питания в электрическую сеть «Сеть», 3 — диодный выпрямитель, 4 — ключ включения заряда конденсатора «Вкл», 5 — разрядный ключ «Поджиг», 6 — лампы-вспышки, 7 — конденсатор, 8 — переключатель, 9 — катушка индуктивности [7]

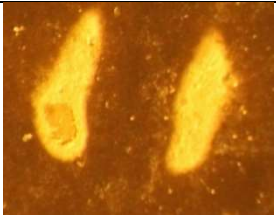

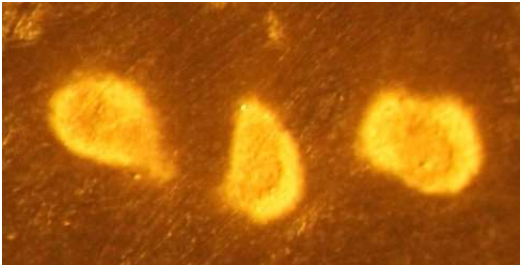
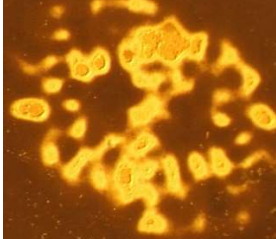

Возможность отключения отдельных секций накопителей, является преимуществом данной схемы, что позволяет регулировать длительность импульса при работе с лазером.

### 2.2.7 Активные элементы твердотельных лазеров

Активные элементы твердотельных лазеров обычно имеют форму стержней прямоугольного или круглого сечения. Наибольшее распространение получила конструкция твердотельного лазера, в которой цилиндрический активный элемент вместе с одной или несколькими газоразрядными лампами накачки помещаются в камеру-осветитель, концентрирующую излучение лампы накачки в активный элемент. Из-за многократности отражения излучения накачки от внутренней поверхности камеры-осветителя достигается более полное его поглощение в активном элементе [1].

Лазер, рассматриваемый в данной работе, является твердотельным, активный элемент которого стекло с включениями неодима  $\text{Nd}^{3+}$  марки ГЛС1 с диаметром 15 мм и длиной 300 мм. Этот ион с наиболее соответствующими параметрами энергетических уровней и наиболее полно отвечает требованиям, выдвинутому к четырехуровневой системе.

Таблица 6 — Селекция мод

		
U — 2,2кВ;d — 3мм	U — 2кВ;d — 3мм	
		
U — 1,8кВ;d — 6мм	U — 1,8кВ;d — 4,1мм	
		U — 2,5 кВ;d — 3мм

Система требует доработок и более полного исследования с большим количеством экспериментов.

## **4 Влияние лазерного излучения на энергетические материалы**

### **4.1 Пиротехнические составы**

Энергетические материалы — вещества или смеси, в которых высвобождение энергии происходит в процессе химической реакции, требуемой для их применения по назначению [13].

Значительный интерес в рассматриваемом аспекте представляют пиротехнические составы. Пиротехнические составы — механические смеси мелкодисперсных порошков, способных к горению. Минимальное количество компонентов в пиротехническом составе — два: окислитель и горючее [14].

В качестве окислителей применяют нитраты, хлораты, перхлораты, оксиды и пероксиды металлов и некоторые хлорпроизводные. Из хлоратов чаще всего применяют соль калия, из перхлоратов — соли натрия, калия и аммония. Преимущество перхлората аммония по сравнению с перхлоратами металлов заключается в том, что при взрыве в первом случае образуются только газообразные вещества, тогда как во втором случае мы получаем не только газообразные, но и твёрдые вещества [14].

В качестве горючих в пиротехнике применяют как неорганические, так и органические вещества. Из неорганических горючих чаще применяют высококалорийные металлы — алюминий, магний, сплавы алюминия с магнием и др. Внимание к исследованию таких частиц в вопросах горения и воспламенения обусловлено множеством факторов, среди которых возможное возрастание скорости горения различных составов при добавлении частиц металлов. Наиболее изученные для применения в таких областях металлы — это алюминий, бор и бериллий. По сравнению с другими, Al является лучшим металлическим активатором из-за высокой теплоты сгорания, низкой стоимости, готовой коммерческой доступности, низкой степени токсичности и относительно высокой эффективности сгорания [15].



Меньшая чувствительность по сравнению с инициирующими взрывчатыми веществами к механическому воздействию и тот факт, что они более чувствительны, чем бризантные взрывчатые вещества к лазерному излучению в режимах модулированной добротности и свободной генерации делают данные вещества перспективными в науке и технике. Известно, что пиротехнические смеси на основе перхлората аммония (АП) и алюминия могут быть использованы для изготовления пиропатронов и других средств зажигания. Лазерная система может быть успешно применена для такого рода устройств в функции воспламенителя [13].

#### 4.2 Методика определения порога зажигания образца

В данной работе используется метод определения порога лазерного инициирования, который ранее использовался для тэна [16]. Данный метод позволяет учитывать погрешность определения порогов лазерного воздействия на образец. За порог зажигания принималась плотность энергии лазерного импульса при вероятности лазерного 50 % зажигания. Схема эксперимента соответствует рисунку 5. Для определения плотности энергии лазерного зажигания воспользовались соотношением:

$$H = \frac{E}{S} \quad (9)$$

где  $S = \pi R^2$  — площадь сечения лазерного пучка,  $R$  — радиус сечения пучка лазера, составляющий 1 мм.

Порог зажигания определялся как плотность энергии лазерного излучения, при вероятности воспламенения 50%. Под зажиганием понималось появление вспышки на образце и регистрируемый сигнал ФЭУ. Вероятность воспламенений определялась как отношение числа лазерных импульсов, повлекших за собой зажигание образца к общему количеству попыток.

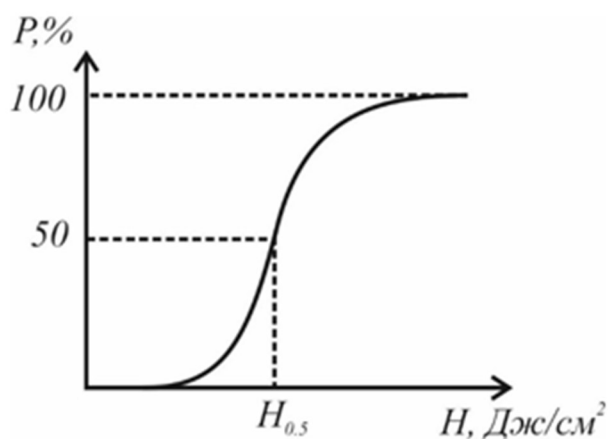


Рисунок 19 — Вероятностная кривая лазерного зажигания смеси  
ПХА/Аl [16]

Исходя из проведенных опытов порог зажигания таблетки смеси ПХА/Аl соответствует  $7,5 \text{ Дж/см}^2$ .

Образцы на которых определялся порог зажигания — смесь перхлората аммония и ультрадисперсного алюминия (60:40) запрессовывалась с помощью прессы при давлении  $100 \text{ дел} - 3770 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$  со средней массой  $90,4 \text{ мг}$  и плотностью  $1,85 \text{ мг/мм}^3$  [17].

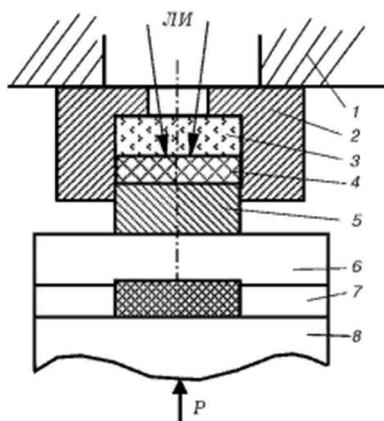


Рисунок 20 — Схема сборки для объемного сжатия образца [16]

1 — верхний упор прессы; 2 — корпус сборки; 3 — входное окно толщиной 5 мм (оргстекло); 4 — навеска; 5 — подпятник; 6 — в входное окно датчика давления; 7 — скоростной пьезоэлектрический датчик давления; 8 — поршень прессы

связанных с изменениями окружающей среды, особенно температуры и атмосферного давления.

Погрешность дозирования составляет более 4 % при учете погрешностей, зависящих только от весов. (Для большинства как жидких, так и сыпучих материалов погрешность дозирования по массе не должна превышать  $\pm 2\%$ )

При первичном выстреле с уровнем накачки 2,3 кВ и диапазона плотности энергий от 5,73 до  $5,99 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$ , вероятность воспламенения образца составляет 30%, когда в свою очередь при повторном облучении уровнями накачки 2,25-2,4 кВ и диапазоном плотности энергии от 5,10 до  $6,7 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$ , вероятность воспламенения возрастает до 46%. При аналогичном опыте при первичном выстреле с уровнем накачки 2,35 кВ и диапазоном плотностей энергии от 6,05 до  $6,37 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$  вероятность воспламенения 40%, когда в свою очередь при повторном облучении уровнями накачки 2,3-2,35 кВ и диапазоном плотности энергии от 4,78 до  $6,05 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$ , вероятность воспламенения возрастает до 67%.

## **5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережения**

### **Введение**

Выпускная квалификационная работа посвящена изучению лазерной установки для зажигания пиротехнических составов и поведение перхлората аммония при лазерном иницировании. Целью данного раздела «Финансовый менеджмент, эффективность использования ресурсов и защита ресурсов» является определение перспектив и целесообразности проведения научных исследований с точки зрения эффективности затрат.

### **5.1 Структура работ в рамках научного исследования**

Научно-исследовательская работа (НИР) — это большая работа, которая начинается с идеи и заканчивается ее воплощением в виде новых теоретических положений, новых методов исследования, технологических процессов, методов организации производства. Успех данной работы зависит от рационального распределения нагрузки по времени и этапам — это позволяет более эффективно распределять и использовать ресурсы ее исполнителей, предварительно определить затраты на проведение работы.

В лаборатории лазерных технологий собран лазерный комплекс для проведения экспериментов. Задачей данной НИР было выяснить является ли пригодной данная установка для зажигания энергетических веществ и дальнейшего анализа данных веществ т.к их использование распространяется на такие области как пиротехнические устройства и электродетонаторы при взрывных работах, где для безопасности проведения работ нужно обеспечить безопасность, что можно достичь при полном понимании механизма лежащего в основе лазерного зажигания энергетических веществ.

Применение лазерного инициирования горения и взрыва энергетических материалов позволило бы значительно удешевить взрывные работы и сделать их безопаснее благодаря помехоустойчивости, что является огромным преимуществом оптических систем над электрическими системами инициирования.

Планирование НИР: составление перечня работ, для достижения поставленной задачи, установление сроков и исполнителей, разработка календарного плана выполнения НИР.

Для того чтобы правильно спланировать и выполнить НИР, необходимо данную работу разделить на этапы:

Таблица 9 — Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работы	Должность исполнителя
Разработка технического задания на НИР	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследований	2	Поиск и изучение материала по теме	Студент
	3	Анализ патентных исследований	Студент
	4	Выбор направления исследований	Научный руководитель
	5	Календарное планирование работ	Научный руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Изучение установки для исследования зажигания ВВ	Студент
	7	Проведение экспериментальной части на установке для изучения ВВ, измерение и получение данных	Научный руководитель, студент
	8	Сравнение результата, полученного в ходе эксперимента с теоретическими исследованиями	Студент
	9	Изучение литературы о воздействии ЛИ на	Студент

		перхлорат аммония с алюминием	
	10	Проведение экспериментальной части с применением перхлората аммония с алюминием	Научный руководитель, студент
	11	Сравнение результата, полученного в ходе эксперимента с теоретическими исследованиями	Студент
Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель, студент
Оформление отчета по НИР	13	Оформление графического материала	Студент
	14	Составление пояснительной записки	Студент

## 5.2 Расчет трудоемкости этапов НИР

Трудовые затраты являются основной частью стоимости НИР и оказывают непосредственное влияние на сроки разработки. Трудоемкость может быть определена во времени на основе нормативов или опытно-статистическим путем. Сложность составления нормативов заключается в многообразии и неоднородности выполняемых работ.

Опытно-статистический метод, может быть реализован двумя вариантами:

1) Методом аналогов – трудоемкость определяется по работам, проведенным ранее с учетом коэффициентов сложности новой разработки

2) Вероятностным методом, когда ожидаемое время выполнения той или иной работы определяется по формуле:

$$t_{ожи} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5} \quad (9)$$

$t_{ожи}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$  – ой работы

$t_{\min i}$  — минимальная трудоемкость выполнения  $i$  — ой работы

$t_{\max i}$  — максимальная трудоемкость выполнения  $i$  — ой работы

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (10)$$

где  $T_{pi}$  — продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожi}$  — ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$  — численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для удобства построения календарного план-графика выполнения работ, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни путем умножения на коэффициент, и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} \quad (11)$$

где  $T_{ki}$  — продолжительность выполнения работы в календ. дн.;

$T_{pi}$  — продолжительность выполнения работы в раб. дн.;

$k_{\text{кал}}$  — коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22$$

где  $T_{\text{кал}}$  — количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$  — количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  — количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_{ki}$  необходимо округлить до целого числа. Результаты расчетов сведены в таблицу



Таблица 10 — Временные показатели проведения НИР

Название работы	tmin		tmax		тожд		Длительность в рабочих днях		Длительность в календарных днях		Дата начала работ		Дата окончания работ	
	Руководитель	Студент	Руководитель	Студент	Руководитель	Студент					Руководитель	Студент	Руководитель	Студент
Составление и утверждение НИР	15		20		17,5		11		15		01.10.2020		15.10.2020	
Поиск и изучение материалов по теме		20		25		22,5		21		30		12.10.2020		10.11.2020
Анализ патентных исследований		20		25		22,5		19		28		19.10.2020		15.11.2020
Календарное планирование работы	10		15		12,5		11			16	20.11.2020		05.12.2020	
Изучение установки для исследования зажигания ВВ	20	30	25	35	25	30	9	19	31	31	07.12.2020		07.01.2020	
Проведение экспериментов	20	30	30	40	20	35	7	17	23	23	11.01.2021		02.02.2021	
Анализ полученных результатов	10	20	10	30	15	20	10	20	29	29	03.02.2021		03.03.2021	
Изучение литературы о воздействии ЛИ на перхлораты		30		40		35		19		29		15.02.2021		15.03.2021
Проведение экспериментов	20	30	25	40	25	32,5	11	21	32	32	05.03.2021		05.04.2021	
Анализ полученных результатов		30		40		35		20		26		05.04.2021		30.04.2021
Составление пояснительной записки		40		45		42,5		32		48		12.04.2021		30.05.2021

### 5.3 Разработка графика проведения научного исследования

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта. Для планирования НИР была выбрана диаграмма Ганта, которая представляет собой тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

	Задачи	tk	Исполнители	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май
1	Составление и утверждение НИР		Студент								
		15	Руководитель								
2	Поиск и изучение материалов по теме	30	Студент								
			Руководитель								
3	Анализ патентных исследований	28	Студент								
			Руководитель								
4	Календарное планирование работы	16	Студент								
			Руководитель								
5	Изучение установки для исследования зажигания ВВ	31	Студент								
		31	Руководитель								
6	Проведение экспериментов	23	Студент								
		23	Руководитель								
7	Анализ полученных результатов	29	Студент								
		29	Руководитель								
8	Изучение литературы о воздействии ЛИ на перхлораты	29	Студент								
			Руководитель								
9	Проведение экспериментов	32	Студент								
		32	Руководитель								
10	Анализ полученных результатов	26	Студент								
			Руководитель								
11	Составление пояснительной записки	48	Студент								
			Руководитель								

График строится в виде таблицы с разбивкой по месяцам за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике выделены различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

#### **5.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)**

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

##### **5.4.1 Расчет материальных затрат НТИ**

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$З_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m Ц_i \cdot N_{расхi} \quad (12)$$

где:  $m$  — количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$  — количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$Ц_i$  — цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  — коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов.

Таблица 11 — Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, ( $З_m$ ), руб
Бумага	лист	150	2	345
Картридж для принтера	шт.	1	1000	1150
Интернет	М/бит (пакет)	1	350	402,5
Ручка	шт.	1	20	23
Дополнительная литература	шт.	2	400	920
Тетрадь	шт.	1	10	11
Итого	2852			

#### 5.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3-5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в табл.

Таблица 12 — Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Катод из титана	ТПЧ, 79х45 мм	1	14600	14600
Мишень из титана	ТПЧ, 120х8 мм	1	12500	12500
Аммоний перхлорат, ИМП, (NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub> )		1	950	950
Алюминий сферический дисперсный	АСД-1,30мм	4	120	480
Всего за материалы				28530

Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)	855,9
Итого по статье С <sub>м</sub>	29358,9

Затраты на электроэнергию для установки «Радуга спектра»:

$$Z_{\text{элек.}} = 7 \text{ кВт} \times 40 \text{ час} \times 6 \text{ руб.кВт/час} = 1680 \text{ руб.}$$

Таким образом, затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ равен 31065,9 руб.

### 5.4.3 Расчет заработной платы

Календарный фонд рабочего времени=Число календарных дней



$$K_{фрв} = 158 \cdot 2 = 316$$

Таблица 13 — Расчет на период разработки лазерной установки.

	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май
Кол-во часов	176	159	183	120	151	176	175	120
Кол-во рабочих дней	22	20	23	15	19	22	22	15
Кол-во праздничных дней	9	10	8	16	9	9	8	16
Кол-во календарных дней	31	30	31	31	28	31	30	31

$$C_{ЗП} = З_{осн} + З_{доп} \quad (13)$$

Средняя заработная плата в Томской области составила 38 787 рублей, в Томске зарплата достигла 48 078 рублей по данным Росстат.

Данные по зарплатам проанализированы при помощи сайта hh.ru где

$З_{осн}$  — основная заработная плата 35000 — руководитель, 22000-лаборант;

$З_{доп}$  — дополнительная заработная плата.

Отпуск работника. Сюда входит основной ежегодные, дополнительный и учебный-40000р

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (14)$$

$$Z_{\text{осн}} = 1194,5 \cdot 59 = 70475,5 - \text{руководитель}$$

$$Z_{\text{осн}} = 750,8 \cdot 188 = 141150,4 - \text{студент}$$

где  $Z_{\text{осн}}$  — основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{р}}$  — продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{\text{дн}}$  — среднедневная заработная плата работника, руб.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot (k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (15)$$

где  $Z_{\text{б}}$  — базовый оклад, руб.;

$k_{\text{пр}}$  — премиальный коэффициент, (определяется Положением об оплате труда);

$k_{\text{д}}$  — коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях — за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: определяется Положением об оплате труда);

$k_{\text{р}}$  — районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

$$Z_{\text{м}} = 35000 \cdot 1,3 = 45000$$

$$Z_{\text{м}} = 22000 \cdot 1,3 = 28600$$

Таблица 14 — Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{б}}$ , руб.	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$ , руб	$Z_{\text{дн}}$ руб.	$T_{\text{р}}$ , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$ , руб.
Руководитель	35000	1,3	45000	1194,5	59	70475,5
Студент	22000	1,3	28600	750,8	188	141150,4

#### 5.4.4 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем — 12 % от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}, \quad (16)$$

где  $З_{\text{доп}}$  — дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$  — коэффициент дополнительной зарплат;

$З_{\text{осн}}$  — основная заработная плата, руб.

В табл. приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

$$З_{\text{доп}} = 70475,5 \cdot 0,12 = 8457,1$$

$$З_{\text{доп}} = 141150,4 \cdot 0,12 = 16938,05$$

Таблица 15 — Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Студент
Основная зарплата	70475,5	141150,4
Дополнительная зарплата	8457,1	16938,05
Итого по статье $C_{\text{зп}}$	78932,6	158088,4
237021		

#### 5.4.5 Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) \quad (17)$$



где  $k_{\text{внеб}}$  — коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

- 22%-пенсионный фонд
- 5,1%-медицинское страхование
- 3.1%- за вредное производство

$$C_{\text{внеб}} = (0,22 + 0,051 + 0,31) \cdot 78932,6 = 28837,5 - \text{руководитель}$$

$$C_{\text{внеб}} = (0,22 + 0,051 + 0,31) \cdot 158088,4 = 47742,7 - \text{студент}$$

#### 5.4.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в табл.

Таблица 16 — Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты НТИ	2852
Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	31065,9
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	211625.9
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	25395.15
Отчисления во внебюджетные фонды	75846.7
Бюджет затрат НТИ	345854.75

## 5.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (18)$$

где  $I_{pi}$  — интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  — весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i$  — бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной школе оценивая.

Таблица 17 — Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	4
2. Удобство использования	0,15	4
3. Надежность	0,2	5
4. Стоимость	0,3	5
5. Возможность реализации	0,25	5
Итого	1	

$$I_{p-исп} = 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,25 = 4,75$$